第 42 卷 第 1 期
2025 年 2 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 42 No. 1
Feb. 2025

DOI:10. 11776/j. issn. 1000-4939. 2025. 01. 013

掺料对陶粒混凝土强度及微观结构影响分析

卜长明[1,2],杨海燕[2,3],陆鑫宇[2,3],朱冬旭[2,3],孙毅[2,3],钟永力[2,3],李妍[2,3]

(1. 桥梁工程结构动力学国家重点实验室暨桥梁结构抗震技术交通行业重点实验室,400067 重庆;
2. 重庆科技大学土木与水利工程学院,401331 重庆;3. 输变电工程防灾减灾重庆市重点实验室,401331 重庆)

摘 要:粉煤灰和石膏粉复合掺入陶粒混凝土是一种新型材料,可以达到废渣利用、减少污染、提高强度等目的,为节能环保做出贡献。通过改变粉煤灰和石膏粉掺量的配合比,进行多龄期抗压强度试验,分析石膏粉掺量对掺粉煤灰陶粒混凝土抗压强度的影响,并结合扫描电子显微镜(scanning electron microscope,SEM)技术,对微观结构进行分析。结果表明:当粉煤灰掺量为 40% 时,试样抗压强度随着石膏粉的掺量增加呈先上升后下降的趋势,石膏粉掺量为 22% ,试样抗压强度达到最大;22% 的石膏粉和 40% 的粉煤灰复掺可以提高其抗压强度,使其微观结构更加紧密,对强度有利的水化产物较多,反之微观结构变得蓬松,其水化产物减少;强度较高的试样界面过渡区(interface transition zone,ITZ)更加紧密。

关键词:陶粒混凝土;粉煤灰;石膏粉;龄期;抗压强度;微观分析

中图分类号:X7 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-4939(2025)01-0125-08

The influence of admixtures on the compressive strength and microstructure of ceramsite concrete

BU Changming[1,2],YANG Haiyan[2,3],LU Xinyu[2,3],ZHU Dongxu[2,3],SUN Yi[2,3],ZHONG Yongli[2,3], LI Yan[2,3]

(1. State Key Laboratory of Bridge Engineering Structural Dynamics and Key Laboratory of Bridge Earthquake Resistance Technology, 400067 Chongqing, China; 2. Chongqing University of Science and Technology, School of Civil and Hydraulic Engineering, 401331 Chongqing, China; 3. Chongging Key Laboratory of Disaster Prevention and Reduction in Power Transmission Engineering, 401331 Chongqing, China)

Abstract:Ceramsite concrete with fly ash and gypsum powder is a new kind of materials,which can achieve the purpose of waste residue utilization,reduce pollution,improve strength,and make contribution to energy conservation and environmental protection. In this paper,through changing the mix proportion of fly ash and gypsum powder,the multi-age compressive strength F-040-G-000 is carried out to analyze the influence of fly ash and gypsum powder on the compressive strength of ceramsite concrete,and combined with the scanning electron microscope (SEM) technology,the microstructure is analyzed. The results show that when the content of fly ash is 40% ,the compressive strength of the specimen first increases and then

收稿日期:2022-10-15
基金项目:国家自然科学基金青年项目(No. 52008070);重庆市自然科学基金项目(No. cstc2021jcyj-msxmX0444);重庆市建设科技计划项目(No. 城科字 2021 第 1-6);重庆市教委科学技术研究项目(No. KJQN201801503);重庆市教委科学技术研究项目(No. KJZD-K202201503);桥梁工程结构动力学国家重点实验室暨桥梁结构抗震技术交通行业重点实验室开放基金
通信作者:孙毅。E-mail:sunyi@ cqust. edu. cn
引用格式:卜长明,杨海燕,陆鑫宇,等. 掺料对陶粒混凝土强度及微观结构影响分析[J]. 应用力学学报,2025,42(1):125-132.
BU Changming,YANG Haiyan,LU Xinyu,et al. The influence of admixtures on the compressive strength and microstructure of ceramsite concrete[J]. Chinese journal of applied mechanics,2025,42(1):125-132.

decreases with the increase of the content of gypsum powder. When the content of gypsum powder is 22% , the compressive strength of the specimen reaches the maximum. Appropriate amounts of gypsum powder and fly ash can improve the later compressive strength, make its microstructure more compact, and more hydration products are beneficial to the strength, on the contrary, the microstructure is better; the interface transition zone (ITZ) of the F-040-G-000 block with higher strength is more compact.

Key words: ceramsite concrete; fly ash; gypsum powder; age; compressive strength; microscopic analysis

随着现代建筑业的不断发展,因其具有高效率、规范化、环保等特点,“十四五”时期国家大力推广装配式建筑和绿色建筑。陶粒混凝土拥有轻质、高强、抗震性能好、保温性能好等特点,可用于生产装配式构件,对改善施工环境有着重要的意义[1]。

粉煤灰 (fly ash, FA) 是一种工业废渣,将粉煤灰掺入陶粒混凝土可降低生产成本,减少污染,做到废物利用,符合绿色混凝土的发展趋势。由于粉煤灰的火山灰反应,将其掺入陶粒混凝土后,可以提高其后期强度[2-4],同时粉煤灰的微集料效应可以使浆体内部更均匀、微观结构更加密实[5-6]。火山灰反应指活性 SiO_2 等与氢氧化钙等物质之间的化学反应[7],如式(1)所示。火山灰反应所需的氢氧化钙等物质由水泥水化反应生成,以硅酸三钙 $3CaO\cdot SiO_2$(简写 C_3S)水化为例[8],如式(2)所示。

石膏粉 (gypsum powder, GP) 包括天然石膏粉、工业副产品石膏粉以及废弃物拆除所得石膏粉,在混凝土中有着广泛的应用,相关的试验研究表明,使用石膏粉加入混凝土是可行的[9]。石膏粉与反应最快的铝酸三钙(C_3A)生成钙矾石(Aft)[10],其产生的微膨胀效应可以有效抑制自收缩产生的微小裂缝[11-12]。

石膏粉的单独掺入会使拌和物脱水,导致试样的孔隙结构变大[13],不利于抗压强度的提高,而粉煤灰的微集料效应可以很好地填充孔隙结构;粉煤灰掺入会降低试样的膨胀效应,而适量的石膏粉可以消除这些负面影响;粉煤灰的活性可以被石膏粉中的硫酸根离子激发,石膏的耐水性可以被粉煤灰水化形成的水硬性矿物改善[14],同时加入粉煤灰和石膏粉的试样,可以相互促进其水化产物的生成,有利于强度的提高,有积极的作用[15-16]。但将两者同时作为外掺料的研究数据不够丰富,因此,将两者同时掺入陶粒混凝土进行研究是非常必要的。

本研究将粉煤灰和石膏粉同时作为外掺料,分析石膏粉掺量对掺粉煤灰陶粒混凝土各龄期抗压强度的影响,结合扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)技术,对不同配合比试样 28 d 龄期的密实性、水化产物等微观结构进行观察分析,从微观结构来验证、解释宏观抗压强度的变化趋势。

$$CH + SiO_2 + H_2O \rightarrow C\text{-}S\text{-}H \tag{1}$$

$$2(3CaO\cdot SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO\cdot 2SiO_2\cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2 \tag{2}$$

1 试验概况

1.1 试验原材料

水泥:水泥使用重庆华新盐井水泥有限公司生产的复合硅酸盐水泥 P. C42.5R,符合国家标准《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)中对硅酸盐水泥的各种要求。

陶粒:采用重庆财山陶粒厂生产的黏土陶粒,其具体性能参数见表 1。

表 1 陶粒性能参数

Tab. 1 Performance parameters of ceramsite

粒径范围/mm	密度等级	堆积密度/($kg\cdot m^{-3}$)	含水率/%	表观密度/($kg\cdot m^{-3}$)	吸水率/%
0 ~ 10	500	476	16.63	758.97	5.53

粉煤灰:采用 I 级粉煤灰,其物理性能指标见表 2。测定结果符合国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T 1596—2005)中关于用于混凝土的粉煤灰的各种要求。

表 2 粉煤灰的物理性能指标

Tab. 2 Physical properties of fly ash

项目	细度/%	烧失量/%	含水率/%	SO_3/%	需水量比/%
测量值	7.5	2.92	0.11	0.53	92
国家标准	≤12	≤5.0	≤1.0	≤3.0	≤95

石膏粉:本研究所使用的石膏粉为工业副产品石膏,符合国家标准《建筑石膏标准》(GB/T 9776—2008)的各种要求。

试验原材料如图 1 所示。

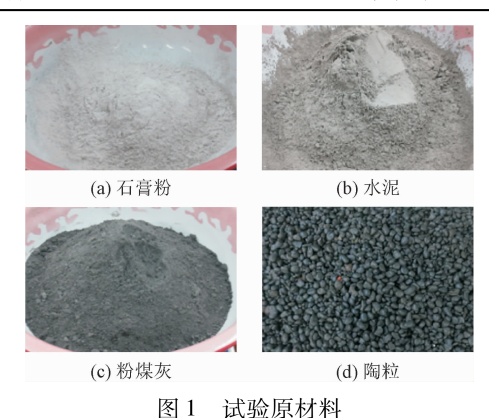


图 1　试验原材料

Fig. 1　Test raw materials

1.2　试验配合比

根据《轻骨料混凝土应用技术标准》(JGJ/T 12—2019)和前期配合比试配试验,确定试验所用配合比见表 3,试样编号采用 F-A-G-B 形式,F 代表粉煤灰,A 代表粉煤灰占水泥质量的比例,G 代表石膏粉,B 代表石膏粉占水泥质量的比例。粉煤灰和石膏粉按水泥质量的一定比例外掺(外掺即把粉煤灰和石膏粉当作外加剂掺入,不减少水泥的用量,增加胶凝材料总量)。

表 3　外掺料陶粒混凝土配合比

Tab. 3　Mix proportion of admixture ceramsite concrte

试样编号	陶粒用量/(kg·m^{-3})	水泥用量/(kg·m^{-3})	水用量/(kg·m^{-3})	粉煤灰		石膏粉	
				用量/(kg·m^{-3})	比例/%	用量/(kg·m^{-3})	比例/%
F-130-G-022	237	444	385	592	1.3	99	0.22
F-040-G-022	237	444	245	178	0.4	99	0.22
F-040-G-044	237	444	282	178	0.4	197	0.44
F-040-G-000	237	444	211	178	0.4	0	0

1.3　试样的制备

陶粒是内部有很多孔隙的一种粗骨料,取代普通混凝土中的碎石或卵石骨料,形成陶粒混凝土,其最大特点是外表坚硬,而内部有许多的微孔,能在短时间内吸收一定量的水分[18]。骨料的 4 种含水状态包括全干状态、气干状态、饱和面干状态和湿润状态(图 2)。全干状态是指骨料在干燥箱烘至恒重的状态,内、外部均不含水;气干状态指骨料内部含有一定的水分,而表面是干燥无水的,骨料在干燥的环境中堆放时往往为气干状态;饱和面干状态指骨料的内、外部均达到饱和状态,外部无明水,当骨料处于这种状态时,对混凝土中的水的用量影响最小;湿润状态指骨料内部达到饱和且外部有明显水膜的状态。在拌制混凝土时,由于骨料含水状态不同,将影响混凝土的用水量,为了避免用水量影响混凝土强度,因此,在混凝土拌合前应将陶粒提前预湿。其具体操作方法如下,将陶粒完全浸泡在水中 24 h,使其充分吸收水量,直至达到饱和状态,试验前,将陶粒取出,风干表面水分,使其达到饱和面干的状态。在计算混凝土中各材料的配合比时,以饱和面干骨料为基准。将称量好的原材料搅拌均匀后加入饱和面干陶粒,搅拌至均匀,再加入称量好的水,继续搅拌均匀,直至拌合物状态良好,装入模具。

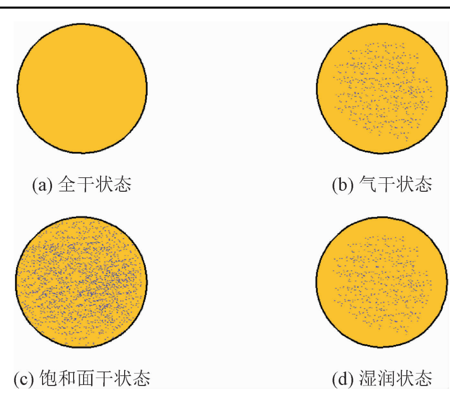


图 2　骨料的 4 种含水状态

Fig. 2　Four moisture states of aggregate

1.4　试验方法

试验方法参照国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019),在温度为(20 ± 2)℃的恒温养护箱分别养护 7、14、28 d,采用标准试验方法测试强度,试样规格为 100 mm × 100 mm × 100 mm,每组 3 块,共 3 组,按式 (3) 计算抗压强度,取计算结果平均值(表 4)。

$$f_c = \frac{F}{A} \tag{3}$$

式中:f_c 为试样抗压强度(MPa);F 为试样破坏荷载(N);A 为试样受压面积(mm^2)。

28 d 试样破坏后,对不同配比的试样进行采样,

将采集的样品放无水乙醇里终止水化后在 45 ℃条件下干燥 24 h,冷却后取出,用扫描电子显微镜(SEM)进行微观图片采集[17],分析试样微观结构和抗压强度的关系。

表 4 试样各龄期抗压强度及 28 d 干密度

Tab. 4 Compressive strength of specimens at different ages and 28 d dry density

试样编号	立方体抗压强度/MPa			28 d 干密度/(kg · m^{-3})
	7 d	14 d	28 d	
F-130-G-022	6.7	7.9	11.4	1 094
F-040-G-022	8.0	12.1	13.4	1 109
F-040-G-044	5.7	7.8	8.0	1 068
F-040-G-000	10.3	11.8	12.9	1 105

2 结果与分析

2.1 强度分析

分别在 7、14、28 d 对不同配合比的试样进行抗压强度试验,图 3 为石膏粉含量为 22% 时不同粉煤灰含量下试样的各龄期抗压强度,图 4 为粉煤灰含量为 40% 时不同石膏粉含量的试样各龄期抗压强度,图 5 为试样在不同龄期的抗压强度。

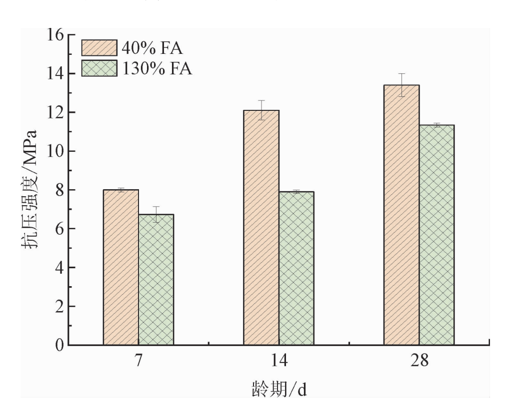


图 3 不同粉煤灰含量下试样抗压强度(石膏粉含量 22%)

Fig. 3 Compressive strength of specimens with different fly ash content (22% gypsum power content)

如图 3 所示,在每个龄期,F-130-G-022 试样的强度都小于 F-040-G-022 试样的强度,表明过多的粉煤灰会降低其抗压强度,在 14 d 时两者强度差值更大,约相差 35%。由于石膏粉掺入后生成钙矾石延缓了水泥的水化,火山灰反应所需的氢氧化钙等物质不足,导致火山灰反应延迟,同时还存在大量未反应的粉煤灰,导致前期强度提升缓慢。试样在14 d后,开始了火山灰反应,生成了大量的 C-S-H 凝胶,从而提高了强度。

对比图 4 中的数据,可以看出,当粉煤灰掺量为 40% 时,22% 的石膏粉加入,小幅度的降低了陶粒混凝土的早期强度,较未掺入石膏粉的强度降低了约 2.3%,分析是由于石膏粉的存在延缓了水泥的水化,虽然对粉煤灰有一定的激发效应,但粉煤灰反应所需的物质不足。在龄期为 14 d 的时候,2 个配比的陶粒混凝土试样强度相差约 3%。28 d 时,加入 22% 的石膏粉的试样强度高于未掺入石膏粉配比的试样的强度约 4.0%,说明 22% 的石膏粉的加入对陶粒混凝土试样的后期强度有一定的优化效果,原因是随着粉煤灰的效应增加,石膏粉的存在会激发和产出更多的水化产物,使微观结构更加密实(图 8b)。44% 石膏粉的加入很大程度降低了陶粒混凝土的早期强度,较未掺入石膏粉的试样强度降低了约 45%。在龄期为 14 d 的时候,2 个配比的陶粒混凝土试样强度相差 33%。在龄期 28 d 时,加入 44% 石膏粉的试样强度仍低于未掺入石膏粉配比的试样的强度,约 38%,44% 石膏粉掺量的试样的抗压强度远远低于掺 22% 石膏粉和未掺石膏粉的试样的强度。

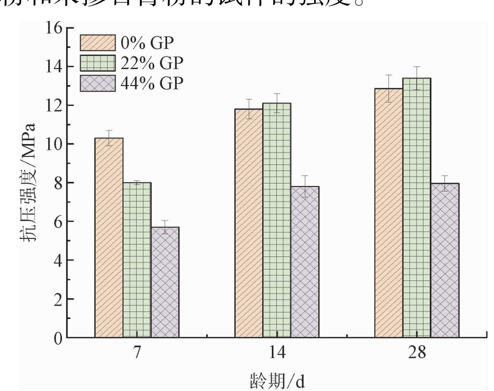


图 4 不同石膏含量下试样抗压强度(粉煤灰含量 40%)

Fig. 4 Compressive strength of specimens with different gypsum power content (40% fly ash content)

由图 5 可知:7 d 时,F-040-G-000 配合比试样的强度最高,F-040-G-044 配合比试样的强度最低;28 d 时,F-040-G-022 配合比试样的强度最高,F-040-G-044 配合比试样的强度最低。F-040-G-044 试样的强度相对较低可能是由以下 3 点原因造成:①44% 的石膏粉加入会延缓水泥前期的水化,但对粉煤灰有一定激发效果,能够在一定程度促进粉煤灰水化,但后期限制了两者的进一步水化;②由于石膏粉的激发效应,粉煤灰的水化作用在早期消耗了更多的氢氧化钙,导致氢氧化钙不足,不足以生成膨胀型水化产物钙矾石;

③存在很多未完全反应的石膏粉。

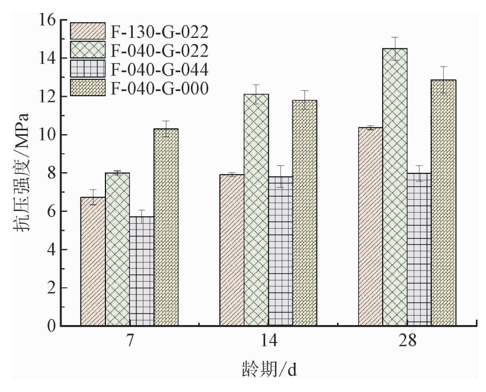


图 5　试样抗压强度随龄期变化图

Fig. 5　Variation of compressive strength with age

40% 的粉煤灰和 22% 的石膏粉复合掺入,使试样的 7 d 强度低于单独掺入 40% 的粉煤灰的强度,但试样的 14、28 d 的强度均升高,分别升高约 3% 和 5% 。可以通过复掺 40% 左右的粉煤灰和 22% 左右的石膏粉来提高外掺料混凝土的强度[15]。

所有试样破坏的过程均相似,在破坏时,试样都会在角部或侧边先出现微裂缝或者在中间出现斜裂缝,顺着裂缝出现的地方开始破坏,表面脱落,直至完全被压坏,破坏时可以明显听到混凝土压碎的声音。图 6 展示了 F-130-G-022 配比试样破坏时的裂缝发展,裂缝首先侧边开始,然后发展到左下角,随后产生较大的斜裂缝,至试样的左边部分和中间靠下部分开始脱落,最后整个试样破坏。从裂缝发展过程来看,裂缝并非沿着一条直线破坏,这是因为试样内部的骨料存在不均匀性。

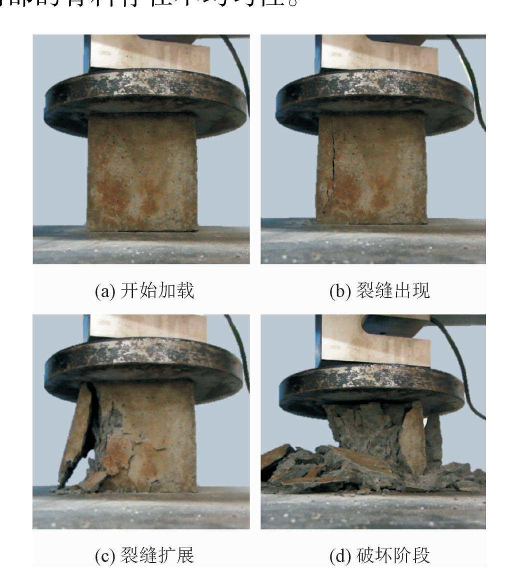


图 6　F-130-G-022 试样破坏过程

Fig. 6　Failure process of F-130-G-022 specimen

从抗压破坏面(图 7)可以看出,试样的破坏,即内部骨料陶粒的破坏,陶粒基本都从断面压坏,这也是陶粒混凝土强度低于普通碎石混凝土的原因,陶粒内部存在很多的孔隙,在轻质的同时,强度也有一定的降低。



图 7　F-130-G-022 试样破坏结果

Fig. 7　Failure result of F-130-G-022 specimen

2.2　微观分析

扫描电镜是利用电子枪发射电子束经聚焦后在试样表面做光栅状扫描,通过检测电子与试样相互作用产生的信号对试样表面的成分、形貌及结构等进行观察和分析[19]。将 28 d 抗压强度测定试样破型压碎后,选取混凝土小试样,试样应尽量平整、小块,将试样放进密封瓶用无水乙醇浸泡,阻止试样继续水化,在进行微观试验前,将试样从瓶中取出,在 45 ℃下烘干至恒重,然后将试样置于 SEM 试样载物片上进行喷金处理,在扫描电镜下观察,通过扫描电镜分析确定了界面过渡区(interface transition zone, ITZ)和水化产物。图 8 为轻骨料混凝土水化产物形貌,放大倍数为 2 000 ×,图 9 为轻骨料混凝土界面过渡区微观形貌,放大倍数为 150 × 。

从水化产物形貌图片来看,F-130-G-022 试样生成了大量的 C-S-H 水化硅酸钙凝胶、氢氧化钙晶体和钙矾石晶体,C-S-H 来源包括第一次水化反应生成大量的 C-S-H、粉煤灰和石膏粉中的氢氧化钙反应、粉煤灰和第一次水化反应生成的氢氧化钙晶体充分反应生成。石膏粉和水泥里的氯酸三钙生成大量的钙矾石晶体,附着在水泥浆体和裂缝上,如图 8(a)。可以看到 F-130-G-022 和 F-040-G-044 试样内存在大量未参与火山灰反应的氢氧化钙晶体,其没有胶结能力,对强度没有贡献。图 8 可以看见未反应的粉煤灰填充了一定的孔隙,降低混凝土的孔隙率,其微集料效应使结构更加密实,和已有文献[20]结论对应。

如图 8(a)和图 8(c) 所示,试样内部有很多明显的裂缝存在,其微观结构也较为蓬松,而图 8(b)

和图 8(d)几乎没有裂缝和空隙存在,且其微观结构也较为紧密,图 8(b)可以看到大量层状的水化硅酸钙凝胶,这些晶体穿插在混凝土的空隙中,形成较致密的微观结构。

如图 9 所示,试样的骨料和水泥浆体之间都形成了一条多孔的带状区域,并且沿着骨料周围分布[21],且连接密实度不同。

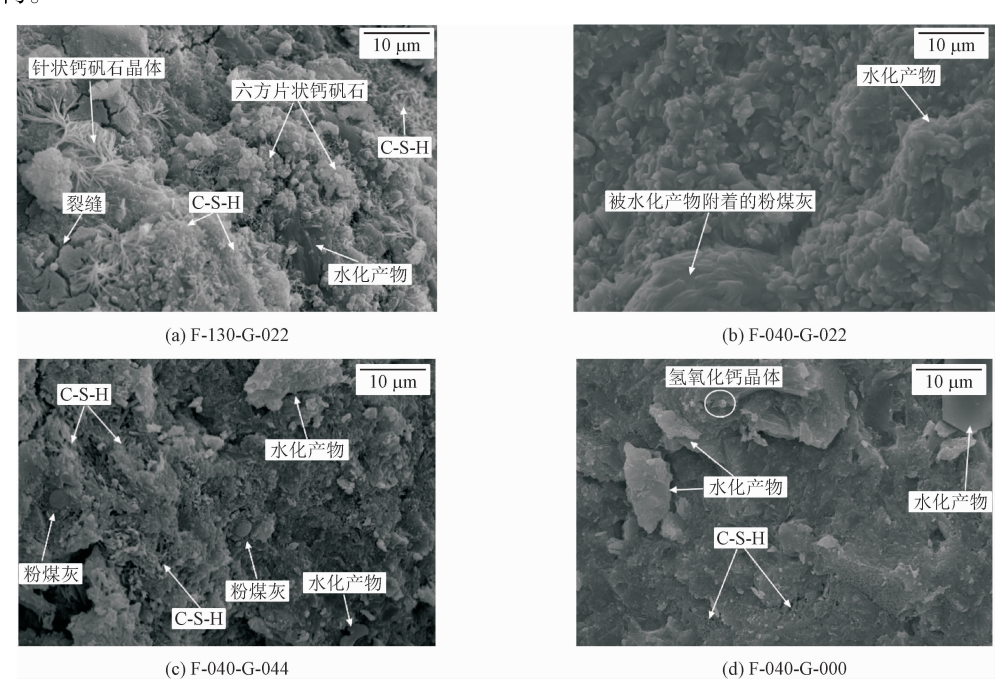


图 8 轻骨料混凝土水化产物微观形貌

Fig. 8 Microstructure of hydration products of lightweight aggregate concrete

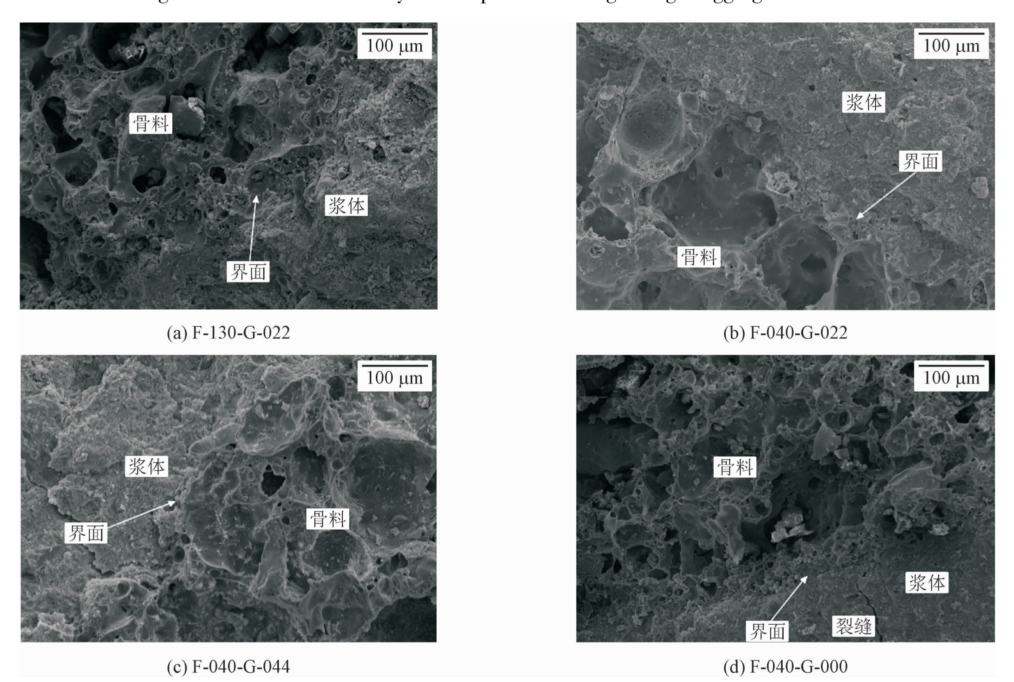


图 9 轻骨料混凝土界面过渡区微观形貌

Fig. 9 Microstructure of interface transition zone of ligheweight aggregate ceramsite concrete

2.3 强度和微观结构相关性分析

如图 8(a)和图 8(c),可以看见较多的裂缝和空隙,且其结构较蓬松,图 8(b)和图 8(d) 的微观图片显示出的孔隙结构较好,水化产物较多,水泥浆体裂缝较少,有相对紧密的微观结构,石膏粉的加入促

进了水泥和粉煤灰的早期水化作用,石膏粉又生成了钙矾石晶体,对前期强度有提升;而后期粉煤灰继续进行二次反应,生成水化产物,少量的未反应石膏粉和粉煤灰颗粒完全填充孔隙,降低孔隙率,使结构更加密实,强度较高。

如图 8 (c) 显示出较蓬松的微观结构、较多的水泥浆体裂缝和孔隙,其对应的混凝土试样强度较低。相反的,强度较高的混凝土试样其微观图片显示出较紧密的微观结构和较多的对强度有利的水化产物。

骨料和浆体的连接区域有一定微裂缝的试样抗压强度较很低,如图 9(c)所示,而图 9(b)和图 9(d)显示的界面过渡区则比较密实,抗压强度较高。

混凝土内部的微观结构对其抗压强度有着重要的影响,混凝土试样抗压强度随着微观结构的相关指标下降而提高,包括裂缝、孔隙等。有效水化产物越多,界面过渡区越紧密,其抗压强度越高。

3　结　论

本研究通过将粉煤灰和石膏粉同时作为外掺料,研究了外掺粉煤灰和石膏粉的陶粒混凝土的抗压强度随龄期变化情况,利用扫描电子显微镜观察了各个配合比试样 28 d 的水化产物形貌及微观结构,验证、解释宏观抗压强度变化趋势,得出以下主要结论。

1)粉煤灰掺量为 40% 时,试样抗压强度随着石膏粉的掺量增加呈先上升后下降的趋势,石膏粉掺量为 22% 时,试样抗压强度达到最大。

2)40% 的粉煤灰和 22% 的石膏粉复掺可以提高其 28 d 抗压强度,较 40% 粉煤灰和 44% 石膏粉复掺试样 28 d 强度提高约 67.5%;较 40% 粉煤灰和 0% 石膏粉复掺试样 28 d 强度提高约 4%。

3)22% 石膏粉和 40% 粉煤灰掺入可以相互促进其水化产物的生成,粉煤灰前后期都进行一定的水化反应,石膏粉在前期激发粉煤灰活性,同时充分发生反应消耗大部分,既保证了前期的强度,又不影响后期的水化反应。

4)复掺石膏粉和粉煤灰可以使试样微观结构紧密,没有明显的微裂缝、氢氧化钙晶体和孔隙,且界面过渡区连接密实。

参考文献:

[1] 廉京哲. 节能建筑材料的应用[J]. 西南大学学报(自然科学版),2008,30(9):174-179.
LIAN Jingzhe. Applications ofenergy-saving construction materials [J]. Journal of Southwest University (natural science edition), 2008,30(9):174-179(in Chinese).

[2] 李瑞,王德志,孟云芳. 矿物掺合料增强粉煤灰陶粒混凝土力学性能研究[J]. 科技通报,2016,32(2):92-95.
LI Rui,WANG Dezhi,MENG Yunfang. Study of mineral admixtures on mechanical properties of fly ash ceramsite concrete[J]. Bulletin of science and technology,2016,32(2):92-95 (in Chinese).

[3] 晏方,陈宇良,陈宗平,等. 粉煤灰陶粒轻骨料混凝土循环受压力学性能试验研究[J]. 硅酸盐通报,2020,39(8):2615-2621.
YAN Fang,CHEN Yuliang,CHEN Zongping,et al. Cyclic compressive mechanical performance of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2020,39(8):2615-2621(in Chinese).

[4] 孙瑶,曹瑞东,张恩,等. 超细粉煤灰改性高强混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土,2020(8):117-120.
SUN Yao,CAO Ruidong,ZHANG En,et al. Experimental study on mechanical properties of ultra fine fly ash modified high strength concrete[J]. Concrete,2020(8):117-120(in Chinese).

[5] 周州,李辉,李雪晨. 粉煤灰制备轻质高强混凝土的试验研究[J]. 硅酸盐通报,2017,36(9):3192-3196.
ZHOU Zhou,LI Hui,LI Xuechen. Experimental study on preparing lightweight & high strength concrete with fly ash[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2017,36(9):3192-3196(in Chinese).

[6] 陈新. 掺粉煤灰陶粒混凝土路面耐久性研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2017.

[7] 张雷,郭利杰,李文臣. 矿物掺合料对水泥孔溶液碱度和强度影响及机理研究[J]. 中国矿业,2020,29(9):141-146.
ZHANG Lei,GUO Lijie,LI Wenchen. Effect of mineral admixtures on alkalinity and strength of cement pore solution and its mechanism[J]. China mining magazine,2020,29(9):141-146(in Chinese).

[8] 霍旭佳,陆超. 硅酸盐水泥矿物组成及细度对混凝土耐久性影响[J]. 人民长江,2020,51(增刊2):294-296.
HUO Xujia,LU Chao. Influence of Portland cement mineral composition and fineness on concrete durability[J]. Yangtze river,2020,51(S2):294-296(in Chinese).

[9] 李鹏飞,栗磊,李亚磊,等. 石灰石粉全轻页岩陶粒混凝土的耐久性能研究[J]. 建筑结构,2019,49(增刊2):617-620.
LI Pengfei,LI Lei,LI Yalei,et al. The durability of concrete of the lightweight and limestone powder[J]. Building structure,2019,49(S2):617-620(in Chinese).

[10] 王贻远,柳倩,刘家祥,等. 磷石膏水泥复合胶凝材料的水化机理[J]. 矿产综合利用,2015(4):63-69.
WANG Yiyuan, LIU Qian, LIU Jiaxiang, et al. Hydration mechanism of phosphogypsum cement composite cementitious material [J]. Multipurpose utilization of mineral resources,2015(4):63-69

(in Chinese).

[11] HAN F H, ZHOU Y, ZHANG Z Q. Effect of gypsum on the properties of composite binder containing high-volume slag and iron tailing powder[J]. Construction and building materials, 2020, 252: 119023.

[12] GESOGLU M, GÜNEYISI E, NAHHAB A H, et al. The effect of aggregates with high gypsum content on the performance of ultra-high strength concretes and Portland cement mortars[J]. Construction and building materials, 2016, 110: 346-354.

[13] SYPEK M, LATAWIEC R, PICHÓR W. Gypsum dehydration in cement and its impact on air-void structure in air-entrained concrete [J]. Construction and building materials, 2019, 220: 396-402.

[14] POON C S, KOU S C, LAM L, et al. Activation of fly ash/cement systems using calcium sulfate anhydrite ($CaSO_4$)[J]. Cement and concrete research, 2001, 31(6): 873-881.

[15] HANSEN S, SADEGHIAN P. Recycled gypsum powder from waste drywalls combined with fly ash for partial cement replacement in concrete[J]. Journal of cleaner production, 2020, 274: 122785.

[16] ZHANG G, LI G X. Effects of mineral admixtures and additional gypsum on the expansion performance of sulphoaluminate expansive agent at simulation of mass concrete environment[J]. Construction and building materials, 2016, 113: 970-978.

[17] 廖国胜,徐路,廖宜顺. 硅灰对硫铝酸盐水泥水化行为的影响机理[J]. 建筑材料学报,2017,20(6):840-845.
LIAO Guosheng, XU Lu, LIAO Yishun. Influence of silica fume on the hydration behavior of calcium sulphoaluminate cement[J]. Journal of building materials, 2017, 20(6): 840-845(in Chinese).

[18] 魏金桥,胡魁,孟旭. 单粒级多孔陶粒混凝土性能研究及其在装配式预制隔墙中的应用[J]. 建筑结构,2020,50(增刊2):473-477.
WEI Jinqiao, HU Kui, MENG Xu. Study on properties of single-grain porous ceramsite concrete and its application in prefabricated partition wall[J]. Building structure, 2020, 50(S2): 473-477(in Chinese).

[19] 苏正军,关立友,石爱丽. 环境扫描电子显微镜工作原理及其气象学应用[J]. 气象科技,2010,38(2):259-262.
SU Zhengjun, GUAN Liyou, SHI Aili. Applications of environmental-scanning electron microscope (ESEM) in meteorology[J]. Meteorological science and technology, 2010, 38(2): 259-262(in Chinese).

[20] 毛明杰,韩鹏飞,杨秋宁,等. 基于正交试验粉煤灰细骨料混凝土抗压强度研究[J]. 混凝土,2019(9):88-91.
MAO Mingjie, HAN Pengfei, YANG Qiuning, et al. Study on compressive strength of fly ash instead of fine aggregate concrete based on orthogonal test[J]. Concrete, 2019(9): 88-91(in Chinese).

[21] 梁圣,崔宏志,徐丹玥. 纳米 SiO_2 改性轻骨料混凝土性能[J]. 复合材料学报,2019,36(2):498-505.
LIANG Sheng, CUI Hongzhi, XU Danyue. Properties of nano-SiO_2 modified lightweight aggregate concrete[J]. Acta materiae compositae Sinica, 2019, 36(2): 498-505(in Chinese).

(编辑 吕茵)